

# PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 06-194708

(43)Date of publication of application : 15.07.1994

(51)Int.Cl.

G02F 1/37

G02B 6/12

H01S 3/109

H01S 3/18

(21)Application number : 05-209239

(71)Applicant : OKI ELECTRIC IND CO LTD

(22)Date of filing : 24.08.1993

(72)Inventor : SHINOZAKI KEISUKE  
MATSUI YASUHIRO  
KAMIJO TAKESHI

(30)Priority

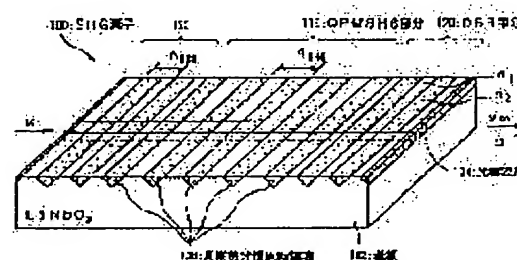
Priority number : 04294692 Priority date : 04.11.1992 Priority country : JP

## (54) SHG ELEMENT, SHG DEVICE AND METHOD FOR DECIDING EFFECTIVE REFRACTION FACTOR OF SHG ELEMENT

(57)Abstract:

PURPOSE: To aim at the effective utilization of energy to a desired basic wavelength by obtaining an effective refraction basis of a real value of the change efficiency and a real value of the reflectance, and making this result feedback to the design of the SHG element.

CONSTITUTION: A substrate 102 of LiNbO<sub>3</sub> of an SHG element 100 is formed with an optical wave-guide 104. This optical wave-guide 104 is provided with periodical polarization reversing areas (domain reversing area) 106 so that refraction factors  $n_1$ ,  $n_2$  thereof are different from each other, and areas, of which period is changed locally, are provided to form parts for satisfying the simulation phase matching condition (QPM SHG part) 110 and parts for satisfying the black reflecting condition (DBR part) 120. With this structure, the SHG wave emitted from the SHG device in two directions are synthesized by an optical synthesizer to utilize the full of the energy output from an LD as a basic wave light source, and the SHG efficiency can be improved practically.



## LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

(19)日本国特許庁(JP)

(12)公開特許公報(A)

(11)特許出願公開番号

特開平6-194708

(43)公開日 平成6年(1994)7月15日

(51)IntCl <sup>5</sup>	識別記号	庁内整理番号	F I	技術表示箇所
G 0 2 F 1/37		9316-2K		
G 0 2 B 6/12	H	8106-2K		
H 0 1 S 3/109		8934-4M		
3/18				

審査請求 未請求 請求項の数12(全 18 頁)

(21)出願番号 特願平5-209239

(22)出願日 平成5年(1993)8月24日

(31)優先権主張番号 特願平4-294692

(32)優先日 平4(1992)11月4日

(33)優先権主張国 日本(JP)

(71)出願人 000000295

沖電気工業株式会社

東京都港区虎ノ門1丁目7番12号

(72)発明者 篠崎 啓助

東京都港区虎ノ門1丁目7番12号 沖電気  
工業株式会社内

(72)発明者 松井 康浩

東京都港区虎ノ門1丁目7番12号 沖電気  
工業株式会社内

(72)発明者 上條 健

東京都港区虎ノ門1丁目7番12号 沖電気  
工業株式会社内

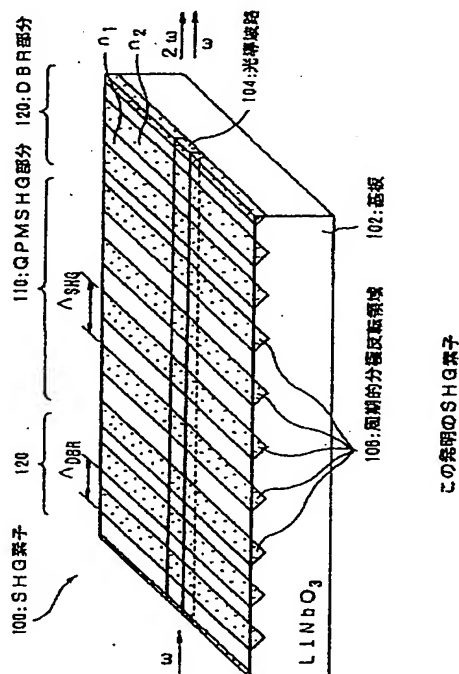
(74)代理人 弁理士 大垣 孝

(54)【発明の名称】 SHG素子、SHG装置およびSHG素子の実効屈折率決定方法

(57)【要約】

【目的】 SHG素子の基本波長に対する実効屈折率Nを正確に決定し、それに基づき任意の基本波長に対応するSHG素子およびこのSHG素子を用いたSHG変換効率の高いSHG装置を提供する。

【構成】 SHG素子の光導波路に可変波長レーザを入射させてSHG変換効率が最大となる基本波の波長 $\lambda_{SHG}$ およびこの波長の近傍の波長で最大の反射を起こす波長 $\lambda_{DBR}$ を求め、計算により実効屈折率および固有屈折率の差 $\Delta n$ 、従って、Nを求める。SHG素子の光導波路に、DBR部分とQPM SHG部分とを個別に設ける。DBR部分は $\Delta n$ を用いて設計出来る。従って、任意の基本波長に対してDBRを設計でき、よって、SHG素子を設計できる。このSHG素子をLDと光学手段を用いて光結合させて、SHG変換効率の高いSHG装置を得る。



この発明のSHG素子

## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 基板に設けた光導波路に周期的分極反転構造を利用したSHG素子において、該光導波路は、周期的分極反転構造の周期がブラッグ反射条件を満たす部分（DBR部と称する。）と擬似位相整合条件を満たす部分（QPM部と称する。）とを個別に具えていることを特徴とするSHG素子。

【請求項2】 請求項1に記載のDBR部とQPM部とを同一の基板上に設けたことを特徴とするSHG素子。

【請求項3】 請求項1に記載のDBR部とQPM部とを個別の基板にそれぞれ設けたことを特徴とするSHG素子。

【請求項4】 請求項1のSHG素子と、半導体レーザと、両者を光学的に結合する光学手段とを具えることを特徴とするSHG装置。

【請求項5】 請求項3に記載のSHG素子のDBR部とQPM部と、該DBR部およびQPM部間にこれらから等距離をもって配設されている半導体レーザと、前記DBR部およびQPM部のそれぞれと前記半導体レーザとを光学的に結合する光学手段を具え、前記半導体レーザの両端面を低反射面としてあることを特徴とするSHG装置。

【請求項6】 請求項4に記載のSHG装置において、\*

$$L = \lambda_{SHG} / \{ 4 [ n(\lambda_{SHG} / 2) - n(\lambda_{SHG}) ] \} \dots\dots (a)$$

$$\Delta n = [ p \lambda_{SHG} / 4L ] - n(\lambda_{SHG}) \dots\dots (b)$$

$$N = n + \Delta n \dots\dots (c)$$

但し、 $n(\lambda)$  は波長 $\lambda$ の光に対するSHG素子を構成している材料の固有の屈折率、

$L$  は分極反転構造の実効的な周期の $1/2$ 、および $p$  は、正の整数であって、 $\Delta n$  が $0 < \Delta n < 0.1$ の範囲に収まるように設定する。

【請求項9】 擬似位相整合条件を満足することでSHGを実現するタイプのSHG素子であって、請求項8に記載のSHG素子の実効屈折率決定方法を用いて決定した実効屈折率に基づいて設計された基板に設けた光導波路の周期的分極反転構造を具えた光導波路を基板に設けたことを特徴とするSHG素子。

【請求項10】 請求項9に記載のSHG素子において、

前記光導波路の温度を制御する温度制御手段と、前記光導波路の電界を制御する電界制御手段とを具えたことを特徴とするSHG素子。

【請求項11】 請求項10に記載のSHG素子において、前記温度制御手段が、前記基板の前記光導波路が設けられた面の裏面に設けたペルチェ素子からなることを特徴とするSHG素子。

【請求項12】 請求項10に記載のSHG素子において、

前記電界制御手段が、前記光導波路上に設けた電極から

\* 前記SHG素子を2個用い、それぞれのSHG素子を前記半導体レーザの入射端および出射端の双方に個別に配設し、これらSHG素子と前記半導体レーザとを光学的手段を用いて結合させてあることを特徴とするSHG装置。

【請求項7】 請求項6に記載のSHG装置において、前記2つのSHG素子からのSHG波を合成する光結合手段を具えることを特徴とするSHG装置。

【請求項8】 周期分極反転構造を利用した光導波路を有し、擬似位相整合条件を満足するタイプのSHG素子を用い、

該SHG素子の光導波路に基本波を導波させて該SHG素子のSHG変換効率が極大となる、基本波に対する波長 $\lambda_{SHG}$ を測定し、

該SHG素子の光導波路に基本波を導波させて該光導波路の基本波に対する反射率が極大となる波長 $\lambda_{SHG}$ を測定し、

これら波長 $\lambda_{SHG}$  および $\lambda_{SHG}$  から次の3つの式

(a)、(b)、および(c)を用いて前記SHG素子

を構成している光導波路の基本波に対する実効屈折率 $N$ を決定することを特徴とするSHG素子の実効屈折率決定方法。

なることを特徴とするSHG素子。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【産業上の利用分野】この発明は、SHG素子、SHG装置およびSHG素子の実効屈折率決定方法に関する。

【0002】

【従来の技術】従来、半導体レーザを基本波光源とする光第2高調波発生素子および装置が知られている。この種の装置は、SHG装置と称せられ、光源（基本波光源ともいう。）として主として半導体レーザ（LDともいう。）を用い、この光源からの出射光の波長を $1/2$ に変換して短波長化を図る装置である。このSHG装置に使用される第2高調波発生素子（SHG素子という。）の一例が文献1：「エレクトロニクス レターズ（Electronics Letters），Vol. 25，（1989），pp. 731-732」に開示されている。

【0003】先ず、この従来のSHG素子の動作原理である擬似位相整合法につき、図5を参照して説明する。図5はこの動作原理を説明するための模式図である。

【0004】このSHG素子10では、 $\text{LiNbO}_3$ 基板12の+c面にTi（チタン）を周期 $\Lambda$ で周期的に熱拡散して分極反転（ドメイン反転ともいう。）構造14を形成してある。この形成のときの拡散温度を約 $110$

0℃とし拡散時間を約1時間とした例である。この分極反転の格子構造14に直交するように、プロトン交換法(Li<sup>+</sup>-H<sup>+</sup>交換法またはイオン交換法ともいう。)により、光導波路16が形成してある。

【0005】このSHG素子10の光導波路16に、角振動数 $\omega$ 、波長 $\lambda$ の基本波が図中左側の端面から入射するとする。入射光はあるm次(但し、 $m=0, 1, 2, 3, \dots, m$ )の伝播モード(伝播横モード)で光導波路中を実効屈折率 $N_m(\lambda)$ で伝播する。周知の通り、この伝播の間に第2高調波(角振動数: $2\omega$ ; 波長: $\lambda/2$ )が発生する。この第2高調波の発生をSHG(Second-Harmonic Generation)

$$L_c = \lambda / \{ 4 [N_n(\lambda/2) - N_m(\lambda)] \} \quad \dots (1)$$

但し、 $N_n(\lambda/2)$ はSH波のn次( $n=1, 2, \dots, n$ )の伝播モードに対する実効屈折率であり、 $N_m(\lambda)$ は基本波のm次の伝播モードに対する実効屈折率である。

【0008】以下、説明を簡単にするために、光導波路16中を基本波もSH波も0次モードで伝播する場合を例に上げて説明する(すなわち、 $m=n=0$ )。以後、ここでは、この場合の実効屈折率を単に $N(\lambda/2)$ および $N(\lambda)$ と書く。ここで、 $L_c$ は、(1)式から明らかなように、 $\lambda$ や光導波路の寸法に依存する。 $N(\lambda)$ は、非線形媒質(LiNbO<sub>3</sub>や、KTiOPO<sub>4</sub>、KTP等)の固有屈折率 $n(\lambda)$ にほぼ等しいが、光導波路の形状や伝播モードにも依存する。 $L_c$ の物理的な意味を説明すると、以下ようになる。

【0009】基本波が、光導波路16中をコヒーレント※

$$\Delta k = (4\pi/\lambda) [N(\lambda/2) - n(\lambda)] \quad \dots (2)$$

この式からわかるように、位相不整合を0とするためには、 $N(\lambda/2) - n(\lambda) = 0$ であることが必要である。しかしながら、一般的に、屈折率は波長に依存するので、このようなことは起こらない。

【0012】そこで、従来は、図5に示すように、コヒーレント長 $L_c$ 毎に分極反転領域14を設けて周期 $\Lambda$ ( $=2L_c$ )の分極反転構造を形成して、位相不整合 $\Delta k$ を補完し、それにより基本波の伝播距離のほぼ2乗に比例した強度のSH波を取り出すようにしている。この位相不整合 $\Delta k$ を完全に補完するための条件は

$$N(\lambda/2) - N(\lambda) - \lambda/\Lambda = 0$$

で与えられる。この条件のことを擬位相整合条件またはQPM条件ともいう。尚、この(3)式についての参考文献として、文献II:「オプティックス コミュニケーションズ(Optics Communications), Vol. 6, (1972), pp301-304」と、文献III:「ジャーナル・オブ・ライトウェーブ・テクノロジー(Journal of Lightwave Technology), vol. 7, No. 10, (1989), pp. 1597-1600」を挙げておく。

【0013】位相不整合が存在する場合でも、(3)式を満足するように周期的分極構造を形成すれば、基本波の伝播距離、従って、SHG素子の長さの2乗に比例するSH波を取り出すことが出来る。

【0014】しかし、(2)式で与えられる条件は、次の2点において技術的に満足させることが難しい。

※cond-Harmonic Generation) とい、この第2高調波をSH(Second-Harmonic)波と称する。このように、このSHG素子10では、基本波のエネルギーの一部分が第2高調波に移る。

【0006】今、仮に分極反転構造が形成されていないとすると、次式で与えられるコヒーレント長(コヒーレンス長ともいう。)  $L_c$ だけ基本波が光導波路16中を伝播すると、基本波からSH波へのエネルギーの変換量が最大となる。

【0007】

※長 $L_c$ だけ伝播すれば、SH波の強度は極大となり、それからさらに $L_c$ だけ進めば、SH波の強度は0となることを意味する。コヒーレント長 $L_c$ が無限大でなく有限な値であるということは、基本波とSH波との位相整合がとれておらず、位相不整合が存在する。位相不整合が存在すると、コヒーレント長 $L_c$ 以上の長い距離にわたり光導波路を基本波が伝播してもSH波の強度はある一定値以上の大きさにはならないことを示している。コヒーレント長は数 $\mu m$ 程度であるので、この程度の短い距離の基本波の伝播では非常に弱いSH波しか得られない。すなわち、充分な強度のSH波を得ようとする、位相不整合を0にしなければならない。

【0010】位相不整合を $\Delta k$ とすると、この $\Delta k$ は次式(2)で与えられる。

【0011】

★ーレント長 $L_c$ 毎に分極反転領域14を設けて周期 $\Lambda$ ( $=2L_c$ )の分極反転構造を形成して、位相不整合 $\Delta k$ を補完し、それにより基本波の伝播距離のほぼ2乗に比例した強度のSH波を取り出すようにしている。この位相不整合 $\Delta k$ を完全に補完するための条件は

$$\dots (3)$$

【0015】[1]実効屈折率 $N(\lambda)$ 、 $N(\lambda/2)$ が光導波路の寸法等に依存し、これを素子の設計(例えば $\Lambda$ を幾らにしたら(3)式を満足させることが出来るか等)の段階で把握することが出来ない。

【0016】[2]基本波光源たる半導体レーザ(LD)の発振波長を必要とされる精度で確定出来ない。すなわち、最適のLDを選択出来ない。(3)式を満足させるために要求されるLDの発振波長の精度は、数nm程度である(例えば、文献IV:「ジャーナル・オブ・アプライド・フィジクス(Journal of Applied physics), Vol. 71, (1992), pp. 22-27」参照。)

【0017】[3]仮に、上記条件を満たすLDとSHG素子との組み合わせが実現しても、SHG素子からの戻り光のためにLDの発振が安定せず、従って、安定したSHGを実現することが困難であった。

【0018】そこで、従来から、基本波光源として波長を可変出来る色素レーザ（或いは、Ti:サファイヤレーザ等の波長可変レーザ）を用いて、(3)式の条件を満足させ、変換効率を大きくする方式をとっている。こうすることにより、充分な変換効率が達成されるようになった。

【0019】次の課題は、基本波光源として色素レーザを用いるとSHG装置が大型化してしまうこと、および、既に気体レーザ等で短波長レーザ光が得られる現在、色素レーザを基本光源として用いるSHG装置は実

10 用的価値がほとんどないという問題を解決することにある。すなわち、あくまで、基本波光源としては、LDを利用しなければならないということである。

【0020】そこで、この出願の発明者らは、上述した課題の解決を図るため、先の特願平3-051930号において、SHG素子からの帰還によってLDの発振を擬位相整合条件を満足する波長で安定的に規定する方法（以後、この方法を自己擬位相整合法またはS-QPM法とも言う）を提案している。この発明の理解を容易

10 にするために、ここでは、先ず、先に提案された技術につき、以下、簡単に説明する。

【0021】図6は、先に提案されている方法の説明に\*

$$\Lambda = 2(2m-1)Lc = p\lambda/2N(\lambda)$$

この条件を具体的にLiNbO<sub>3</sub>を例にして説明する。

また、基本波の波長は、1.3μm近傍である場合を想定する。すなわち、LD22は、InP/InGaAsP系である。光導波路16は前述したイオン交換法で形成する。また、周期的分極反転構造14は、Ti熱拡散\*

$$\begin{aligned} n^2(\lambda) - 1 = & 3.5567 - 2.605 \times 10^{-2} T^2 \\ & + (0.970 \times 10^5 + 2.70 \times 10^{-2} T^2) \\ & \times [\lambda^2 - (2.01 \times 10^2 + 5.4 \times 10^{-5} T^2)^2]^{-1} \\ & - 2.24 \times 10^{-8} \lambda^2 \end{aligned}$$

但し、Tは雰囲気温度、およびλは波長である。ここで、光導波路の実効屈折率N(λ)が(5)式で近似出来るものとして、(4)式の条件をグラフにしたのが図7である。

【0026】図7は、横軸には基本波の波長(nm)および縦軸にコヒーレント長Lc(nm)および40次から45次までのブラック反射率を満足する分極反転領域の寸法Lw(nm)をとって示した図である。同図において、コヒーレント長Lcをパラメータとしたときの、曲線の交点が(4)式の条件を満足する。しかし、LiNbO<sub>3</sub>の固有の屈折率は光導波路の実効屈折率とは僅かではあるが異なるはずである。そこで、とりあえず、この近似に基づいて、分極反転周期を求めて、これを第一近似として話を進めることにする。先の出願で発明者らが提案している方法に従って以下の作業を説明する。

【0027】LD22の利得が最大となる波長は、1.3μm程度であったので、S-QPM SHGが実現する周期Λは、上述した(4)式でp=40~45とする

\* 供する、SHG装置20を拡大して模式的に示した斜視図である。22は半導体レーザ(LD)、24はレンズ等の光学的手段である。この装置20では、SHG素子10からの帰還によりLD22が発振する配置関係と成っている。この発振光が以下述べるように、QPM条件を満足するようになっている。

【0022】周期的分極反転格子はブラッグ反射器(Distributed Bragg Reflector: DBRと略称する。)としても機能する。この周期ΛがQPM条件を満足し、かつ、基本波の波長に対して光反射条件を満足するようになっていれば、光導波路からの帰還光(DBRからの帰還光)によりQPM条件を満足する波長でLDが発振することになる。すなわち、S-QPMが実現することを意味する。ここで用いるLD22は、端面が低反射コーティング（以後、ARコーティングと称する。）されており、それ自身では通常の注入電流値では発振せず、あるバイアス電流を流した状態で分極反転格子からの帰還光を得て初めて発振するようにしておく。すなわち、次式(4)を満足するよう

20 に、Λが形成されていれば、S-QPMが実現することとなる。尚、この式(4)でpを正の整数とする。

$$\Lambda = 2(2m-1)Lc = p\lambda/2N(\lambda) \quad \dots (4)$$

※法で形成する。

【0024】一方、LiNbO<sub>3</sub>の屈折率n(λ)の波長依存性は次式(5)の実験式で与えられる。

【0025】

と、波長1200~1400nmの範囲でΛは約5600~約7400nmの範囲と成る。従って、Lcとの交点は、上記第一近似により、ほぼ6.0~7.0μmの範囲内に数点あると推定できる。すなわち、図7によれば、S-QPM SHGが実現するのはほぼ0.6, 6.25, 6.5, 6.75μmと推定される。そこで、この程度の周期のものをいくつか作り実験的に最適な周期を知った。実験によれば、分極反転構造の周期が6.5μmのものが適していることがわかった。この周期を図7中に、直線L<sub>1</sub>で示す。

【0028】図8により、この実験の概要を説明する。図8の構成は、SHG素子10を例えば光ファイバ等の光学的手段30を介して基本波光源32に結合してあり、34, 36は例えばレンズ等の光学系であり、38はLDである。尚、光学系36は基本波のモニタに用いるものであり、所要に応じて設ければ良い。また、40は、フィルタである。基本波光源32として用いたLD38の両端面は低反射コーティング(AR)してある。

入射端面の一方を予め光導波路の入射端面に位置合わせしておいた光ファイバ30に接続する。このようにしておいて、LD38に電流を注入すれば発振してS-QPM SHGが実現し、フィルタ40からSH波が出力する。

【0029】図9にこのLD38の発振スペクトルを、図10にSHGスペクトルをそれぞれ示す。これらの図は、いずれも横軸( $\mu\text{m}$ )に波長を取り、縦軸に光強度(任意の単位)をとって示してある。これらの図から、基本波光源の波長は、 $1.327\mu\text{m}$ 、SH波の波長は $662.4\mu\text{m}$ であることがわかる。ちなみに、LD38とSHG素子10との光学的結合をとしてLD38の発振スペクトルを調べたところ、図11に示すスペクトル分布を得た。この実験結果からも理解出来るように、\*

$$N(\lambda) = n(\lambda) + \Delta n$$

ここで、 $\Delta n$ は、経験的に波長 $\lambda$ にほとんど依存しない。この $\Delta n$ は、この出願の発明者らが既に文献V:「ジャパニーズ・ジャーナル・オブ・アプライド・フィジックス(Japanese Journal Applied Physics), Vol. 31, (1992), pp. 2104-2108」で報告しているように、実験的にはほぼ0.05であることが知られている。勿論、この値は、 $\text{LiNbO}_3$ についてであり、物質が異なれば、当然この値も変わってくるし、厳密には光導波路の形状、形成方法にも依存する。従って、ここで基本的な問題は、次の3点となる。

【0032】①SHG素子の設計の時点でこの $\Delta n$ を正確に知らなければ、S-QPM SHGを効率よく実現出来ないこと。従来は、この $\Delta n$ を求めること自体行なわれていなかった。

【0033】②また、さきの出願に係るS-QPM SHGにおいては、(4)式を満足する分極反転構造の周期は離散的にしか存在しないので、任意の波長に対してSH波を発生するSHG素子を設計することができないこと。

【0034】③また、さきの出願に係るS-QPM SHGにおいては、LDからの出射光がSHG素子の光導波路に入射するのは、この出射光の半分程度であり、従って、出射光を基本波光として有効的に利用出来ないこと。

【0035】

【発明が解決しようとする課題】従って、これまでに提案されているSHG技術においては、下記のような解決すべき課題がある。

【0036】上記①について：一般に、 $\text{LiNbO}_3$ 、 $\text{LiTaO}_3$ 、KTP等に光導波路を形成する場合、光導波路の部分周期的にイオン交換法を用いて屈折率を変える。具体的に説明すると、 $\text{LiNbO}_3$ 、 $\text{LiTaO}_3$ に対しては $\text{Li}^+$ イオンを $\text{H}^+$ イオンと交換する。このイオン交換には安息香酸やピロリン酸が使われる。

\* 図9のスペクトル中に生じていた発振ピーク( $1.327\mu\text{m}$ )がなくなって、なだらかなスペクトルとなっているので、LD38の発振が停止したことが理解出来る。この実験から、分極反転構造の周期は $6.5\mu\text{m}$ であることが図7から推定される。

【0030】次に考察すべきことは、分極反転構造の周期の最適性についてである。すなわち、式(4)を完全に満足させる周期を求めるには光導波路の実効屈折率 $N(\lambda)$ を知る必要がある。この $N(\lambda)$ は $\text{LiNbO}_3$ の固有の屈折率 $n(\lambda)$ すなわち式(5)で与えられる屈折率よりも僅かに大きくなっているはずである。これを式で表現すれば、次式の通りとなる。

【0031】

$$\dots (6)$$

交換された部分はそれぞれ $\text{Li}_x\text{H}_{1-x}\text{NbO}_3$ 、 $\text{Li}_x\text{H}_{1-x}\text{TaO}_3$ 、( $x$ は組成比を表す値であって、 $0 < x < 1$ )となり、非交換部分よりも屈折率が高くなる。

【0037】KTPについては、 $\text{K}^+$ イオンを $\text{Rb}^+$ イオンと交換し、 $\text{K}_x\text{Rb}_{1-x}\text{TiOPO}_4$ にする。

【0038】イオン交換には、 $\text{RbNO}_3$ 、 $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ の混合融液が使われる。交換された部分が非交換部分に比べてやはり屈折率が高くなり、また、分極方向が反転する。これらの屈折率変化量は、交換されたイオン濃度に比例する。イオン濃度は基板表面が一番高く、基板内部に進むにつれて低くなるように分布する。このような複雑な屈折率分布形状をした光導波路中を伝播する光に対する実効屈折率を解析的に求めることは事実上困難である。そこで、実験的にこの実効屈折率を求める必要があるが、従来は、この実効屈折率を求めることは行なわれていなかったし、また、これを求める方法も提案されていなかった。

【0039】ところで、仮に実効屈折率を求めることができたとしても、光導波路の周期的分極反転構造の周期を正確に形成することは、例えばフォトリソグラフィ及び熱拡散の技術では制約があり、また、SHG素子の温度変化によっても実効屈折率は変化してしまう。

【0040】上記②について：図7に示したように、交点は波長にして、ほぼ $0.25\mu\text{m}$ 間隔に飛び飛びに存在する。すなわち、この間の波長に対してはSHGを実現することが出来ない。

【0041】上記③について：図8に示した実験に用いたSHG装置の構成では、LDの出射光のうち、一方の端面からの出射光のみがSHG素子の光導波路に入射する構成となっている。他方の端面からの出射光はこの構成ではスペクトルアナライザに導いているので、事実上SHGに寄与していない。この実験では基本波光の波長をモニタするためにこのような配置を取っているが、実用上はこのスペクトルアナライザに導かれている基本波も有効に使われるようにするのが望ましい。このように

有効に使われるようになれば、光導波路中の基本波のエネルギー密度は2倍にすることができ、SH波の出力強度を4倍にすることが出来る。

【0042】この発明は、上述した諸課題に鑑みなされたものであり、従って、この発明はSHG素子及びSHG装置の設計に必要な実効屈折率を決定する方法、および任意の基本波長に対して、エネルギーの有効利用が図れるSHG素子およびSHG装置を提供することにある。

【0043】

【課題を解決するための手段】この目的の達成を図るため、この発明のSHGの実効屈折率決定方法によれば、\*

$$L = \lambda_{snc} / \{4 [n(\lambda_{snc} / 2) - n(\lambda_{snc})]\} \dots\dots (a)$$

$$\Delta n = [p \lambda_{prr} / 4L] - n(\lambda_{prr}) \dots\dots (b)$$

$$N = n + \Delta n \dots\dots (c)$$

但し、 $n(\lambda)$ は波長 $\lambda$ の光に対するSHG素子を構成している材料の固有の屈折率、 $L$ は分極反転構造の実効的な周期の $1/2$ 、および $p$ は、正の整数であって、 $\Delta n$ が $0 < \Delta n < 0.1$ の範囲に収まるように設定する。

【0045】また、この発明のSHG素子によれば、擬似位相整合条件を満足することでSHGを実現するタイプのSHG素子であって、上述のSHG素子の実効屈折率決定方法を用いて決定した実効屈折率に基づいて設計された周期的分極反転構造を具えた光導波路の基板に設けたことを特徴とする。

【0046】また、好ましくは、上述のSHG素子において、光導波路の温度を制御する温度制御手段と、光導波路に電界を印加する電界制御手段とを具えることが望ましい。

【0047】また、好ましくは、温度制御手段が、基板の前記光導波路が設けられた面の裏面に設けたペルチェ素子からなることが望ましい。

【0048】また、好ましくは、電界制御手段が、光導波路上に設けた電極を以って構成されてなることが望ましい。

【0049】また、上述したSHG素子の実施例としては、基板を $\text{LiNbO}_3$ 、基板とし、この $\text{LiNbO}_3$ 、基板の+C面に周期的分極反転構造及び光導波路を設け、電極は、前記光導波路上に設けられた第1の電極と、 $\text{LiNbO}_3$ 、基板の、第1の電極の両側の部分にこの第1の電極に沿ってそれぞれ設けられた第2の電極とで構成してあることが望ましい。

【0050】また、上述したSHG素子の他の実施例としては、基板を $\text{LiTaO}_3$ 、基板とし、この $\text{LiTaO}_3$ 、基板の-C面に周期的分極反転構造及び光導波路を設け、電極は、光導波路上に設けられた第1の電極と、 $\text{LiNbO}_3$ 、基板の、第1の電極の両側の部分にこの第1の電極に沿ってそれぞれ設けられた第2の電極とで構成してあることが望ましい。

【0051】また、好ましくは、光導波路と前記第1の

\* 周期的分極反転構造を利用した光導波路を有し、擬似位相整合条件を満足するタイプのSHG素子を用い、該SHG素子の光導波路に基本波を導波させて該SHG素子のSHG変換効率が極大となる、基本波に対する波長 $\lambda_{snc}$ を測定し、該SHG素子の光導波路に基本波を導波させて該光導波路の基本波に対する反射率が極大となる波長 $\lambda_{prr}$ を測定し、これら波長 $\lambda_{snc}$ および $\lambda_{prr}$ から次の3つの式(a)、(b)、および(c)を用いて前記SHG素子を構成している光導波路の基本波に対する実効屈折率 $N$ を決定することを特徴とする。

【0044】

電極との間に光導波路の屈折率より小さな屈折率を有しかつ基本波及び第2高調波を実質的に吸収しない誘電体膜を具えると良い。

【0052】また、この発明のSHG素子によれば、基板に設けた光導波路に周期的分極反転構造を利用したSHG素子であって、該光導波路は、周期的分極反転構造の周期がブラッグ反射条件を満たす部分(DBR部と称する。)と擬似位相整合条件を満たす部分(QPM部と称する。)とを個別に具えていることを特徴とする。

【0053】この場合、好ましくは、DBR部とQPM部とを同一の基板上に設けるのが良い。

【0054】また、別の実施例では、好ましくは、DBR部とQPM部とを個別の基板にそれぞれ設けるが良い。

【0055】また、この発明のSHG装置によれば、上述したSHG素子と、半導体レーザと、両者を光学的に結合する光学手段とを具えることを特徴とする。

【0056】また、この発明の好適実施例のSHG装置においては、上述したSHG素子のDBR部とQPM部と、該DBR部およびQPM部間に配設されている半導体レーザと、前記DBR部およびQPM部のそれぞれと前記半導体レーザとを光学的に結合する光学手段を具え、前記半導体レーザの両端面を低反射面としてあるのが良い。

【0057】また、この発明の他の好適実施例のSHG装置において、前記SHG素子を2個用い、それぞれのSHG素子を前記半導体レーザの入射端および出射端の双方に個別に配設し、これらSHG素子と前記半導体レーザとを光学的手段を用いて結合させてあるのが良い。

【0058】また、この発明の他の好適実施例のSHG装置において、前記2つのSHG素子からのSHG波を合成する光結合手段を具えるのが良い。

【0059】

【作用】上述したSHG素子の実効屈折率の決定方法によれば、周期的分極反転構造を利用した光導波路を有す



る擬位相整合条件を満足するタイプのSHG素子を用意する。このため、SHG素子を非線形光学材料の固有の屈折率の波長依存性に関するデータを用いて、予定されている基本波の波長に対するコヒーレンス長を求める。そして、このコヒーレンス長の2倍あるいはこのコヒーレンス長さの奇数倍の長さの周期の分極反転構造の\*

$$L = \lambda_{SHG} / \{4 [n(\lambda_{SHG}/2) - n(\lambda_{SHG})]\} \dots\dots (7)$$

但し、 $n(\lambda_{SHG}/2)$  および  $n(\lambda_{SHG})$  はSHG素子の非線形光学材料の固有の屈折率である。Lは分極反転構造の実効的な周期の1/2に相当する。

【0062】次に、この光導波路に再びSHG変換効率が最大となった近傍の基本波の波長の光を入射させて、※

$$\Delta n = p \lambda_{SHG} / [4L - n(\lambda_{SHG})] \dots\dots (8)$$

但し、 $n(\lambda_{SHG})$  は、 $\lambda_{SHG}$  に対する非線形光学材料の固有の屈折率、pは、正の整数であって、 $\Delta n$  が  $0 < \Delta n < 1$  の範囲に収まるように設定する。

【0063】基本波の波長や非線形光学材料により、式(8)のLは、この値そのものでなく、その奇数倍をとるべきこともある(基本波の波長が短い場合、あるいは★

$$N = n + \Delta n \dots\dots (9)$$

を決定することが出来る。このような決定方法であると、任意の基本波の波長に対して、波長の実測値より正確に $\Delta n$ 、従って、実効屈折率Nを求めることが出来る。

【0065】また、実効屈折率Nを正確に把握した上で、QPM構造を有するSHG素子を作り、さらに温度制御及び電界印加によるポケルス効果を用いて光導波路の屈折率を制御すれば、SHGへの変換効率を理想的な値に近づけることができる。その結果、エネルギーのより有効な利用を図ることができる。

【0066】次に、この発明の上述したSHG素子によれば、SHG素子の光導波路の一部をDBR構造とし、QPM構造である周期的反転構造とは分離して構成する。このDBR構造の周期および分極反転構造の周期を求めるには上述した実験より求めた $\Delta n$ を用いる。従って、このSHG素子の光導波路は、この $\Delta n$ を求めたときに使用した光導波路の形成条件と実質的に同一の条件で形成する。このように、DBR部分とQPM-SHGの機能を有する部分とを分離してSHG素子を形成しているため、このDBR部分を任意の基本波に対して独立して設計出来る。従って、SHG素子自体を、一定の離散的な基本波の波長に対してのみならず、基本波のい☆

$$L_{SHG} = q \lambda / 4 [n(\lambda) + \Delta n]$$

但し、 $\lambda$  は基本波の波長、qは正の整数であって、素子の製作が可能な範囲で出来るかぎり小さいことが望ましい。

【0070】

【実施例】以下、図を参照して、この発明の実施例につき説明する。尚、この発明のSHG素子及びSHG装置の構成を示す図は、この発明が理解出来る程度の、その

\* 光導波路を基板に形成する。

【0060】次に、このSHG素子の光導波路に、可変波長レーザを入射させてSHG変換効率が最大となる基本波の波長 $\lambda_{SHG}$ を測定により求める。この値を用いて次式(7)で与えられるLを求める。

【0061】

※ 光導波路からの反射が最大となる波長 $\lambda_{SHG}$ を求める。

この波長 $\lambda_{SHG}$  および前述のLから次式(8)から $\Delta n$ を求める。この後者の実験では、光源として必ずしもレーザを用いる必要はない。

★は、コヒーレンス長が短く、1 $\mu$ m程度以下である場合等がこれに該当する。式(8)は波長にほとんど依存しないことが経験的にわかっているため、 $\lambda_{SHG}$ の代わりに一般的に $\lambda$ と表すことが出来る。

【0064】これらの両者から式(9)を用いて

☆ ずれかの任意の波長に対応して設計出来る。

【0067】さらに、この発明の上述した構成のSHG装置によれば、上述したこの発明のSHG素子を半導体レーザとを光学的手段を用いて光結合させれば構成することが出来る。このSHG装置によれば、SHG素子自体が所要の波長の基本波に対応して形成されたものであるから、この装置自体も基本波光源の対応する波長に対して適応して動作する。そして、SHG素子を光源に対して適当に組み合わせ配設することにより、程度の差はあるかもしれないが、半導体レーザ(LD)からの基本波を効率良くSH変換させること、従って、SHG効率を向上させることが可能となる。

【0068】例えば、LDの一方の端面を光反射率コーティング(HR)とする代わりにARコーティングする。そして、このLDをDBR構造を有する光導波路と光学的に結合する。このDBRの周期は上述したSHG素子の基本波光源の波長に対して有効に機能するように設定する。このとき、上述したようにして求めた $\Delta n$ を用いる。具体的には、この周期 $2L_{SHG}$  ( $= \Lambda_{SHG}$ )は次式(10)を満足するように設定する。

【0069】

$$\dots\dots (10)$$

構成成分の形状、大きさおよび配置関係を概略的に示してあるにすぎない。

【0071】<SHG素子の実効屈折率の決定方法の説明>これは、光導波路の実効屈折率を実際に測定して求める。非線形光学材料(LiNbO<sub>3</sub>, LiTaO<sub>3</sub>, KTP等)の固有の屈折率の波長依存性に関するデータをもとに、S-QPM SHGが実現すると予想される

周期で分極反転構造を持つ光導波路を形成する。そして、波長可変レーザによりこの光導波路に対してSHG変換効率が最大となる基本波の波長を先ず求める。このデータをもとにコヒーレンス長を求め、この結果から光導波路中を伝播する基本波の実効屈折率を数値解析により求める。これらの手続きにより $\Delta n$ を求める。

【0072】SHG素子の基板をLiNbO<sub>3</sub>で形成した場合につき説明する。また、基本波光源として、InP/InGaAsP半導体レーザを使用する場合を想定して説明する。

【0073】先ず、InP/InGaAsP LDで、レーザ発振を起こす前は図11に示すようなスペクトルを示すものを用いる場合を例に挙げて説明する。この図11から明かなように、このLDの利得の最大は1.32 $\mu$ mである。基本波の波長がこの近傍である場合のコヒーレンス長とI.c. DBR条件(第40次から第45次)とを示したのが、既に説明した図7である。この図7は、周期的分極反転構造が擬似位相整合としての機能とDBRとしての機能とを兼ねるための条件を与えている。

【0074】S-QPM SHGの原理に立ち返って考えると、SHG素子からの帰還によりLDが発振し、この発振光がQPM条件を満足することが要点である。すなわち、このS-QPM SHGでは、QPMを実現す\*

$$L = 3\lambda_{inc} / \{4[n(\lambda_{inc}/2) - n(\lambda_{inc})]\} \dots (11)$$

を満足するLの値を求める。実験によれば、図12から分かるように、 $\lambda_{inc}$  はほぼ924nmである。この波長の固有屈折率 $n(\lambda_{inc} = 924\text{nm}) = 2.164$ であり、また、 $n(\lambda_{inc}/2 = 462\text{nm}) = 2.271$ であるので、既に説明した(5)式にこれらの値を代入して計算すると、 $L = 6.498\mu\text{m}$ となる。

【0077】次に、1.3 $\mu$ mの近傍の光をだす発光ダイオード(LED)をもちいてこの光導波路からの反射特性を調べた。これによると、1.327 $\mu$ mにおいて、反射率の極大を観測した。この結果を既に説明した(10)式に代入すると以下の結果となる。但し、ここでは、 $p = 43$ とする。

$$\begin{aligned} \Delta n &= p \times 1.327 / 4 \times 6.498 - n(1.327) \\ &= 43 \times 1.327 / 4 \times 6.498 - 2.144 \\ &= 0.0513 \end{aligned}$$

このようにして、 $\Delta n$ を求めることが出来た。実験精度等から $\Delta n = 0.05$ としてよい。この値 $\Delta n$ は基本波光源の波長が数十nm変わってもほとんど変化しないので、以下説明するSHG素子の設計に有効な値として用いることが出来る。

【0079】もう少し $\Delta n$ を精度良く求めるためには、製作条件を同一とした光導波路であって、分極反転構造の周期を数種類変えたものを用意して、それぞれにつき $\Delta n$ を求めてそれらの平均値を求めれば良い。

\*. するための分極反転構造部分とDBR部分を兼用することが必須要件ではない。素子の設計の時点で、光導波路の実効屈折率が分かっているならば、DBR機能をもつ部分とQPMを実現するための部分とを分離して構成することが出来る。

【0075】そこで、ここでは先ず、既に説明した(8)式に従って、 $\Delta n$ を求める。以下、基本波光源として1.3 $\mu$ m帯のLDを予定して行なった試作実験を例に挙げて、具体的な方法を説明する。

10 【0076】先ず、フォトリソグラフィ等の一般的な技術を用いて周期が6.5 $\mu$ mの分極反転構造をLiNbO<sub>3</sub>基板のz面(c面でもある)にTi熱拡散法で形成する。その後、安息香酸を用いて光導波路を形成する。この段階では実効的に分極反転構造の周期は6.5 $\mu$ mに形成されている保証はない。そこで、Ti:サファイヤレーザをこの光導波路に導いて $\lambda_{inc}$ を求める。図12がその結果である。図12は、横軸の基本波の波長(nm)を取り、縦軸にSHの光強度を任意の単位でとって示したTi:サファイヤレーザのスペクトル分布図である。Ti:サファイヤレーザの利得範囲が920から930nm程度に限られている関係で、3次のQPM条件から分極反転構造の周期2Lを求めることになる。このとき、式(4)において、実用性を考慮したmの最大値から $m = 2$ と設定した。すなわち、

【0080】また、この実施例では、LiNbO<sub>3</sub>を例にとって説明したが、他の材料であっても上述した実施例と同様にして $\Delta n$ を求めることにより、光導波路の実効屈折率を知ることが出来る。

30 【0081】<変換効率を向上させるための温度及び電界制御手段の説明>次に、上述の方法を用いて求めた実効屈折率に基づき、基板に設けた光導波路の周期分極反転構造の周期を決定したSHG素子の例について説明する。

【0082】図13に示すSHG素子は、より理想的な変換効率の達成を図るために、温度制御手段300と、電界制御手段302とを具えている。このSHG素子は、LiNbO<sub>3</sub>の基板304とこの基板304の+C面に設けられた周期的分極反転構造306及び光導波路308とを具え、さらに周期的分極反転構造306の光導波路中に当たる部分に電界を加えるための電極として、光導波路上に誘電体膜310を介して設けられた第1の電極302aと、基板304の第1の電極302aの両側の部分にこの第1の電極302aに沿ってそれぞれ設けられた第2の電極302bとで構成した電極302を具えている。

【0083】また、基板304の電極302を設けた面の反対側の面には、温度制御手段としてのベルチェ素子300を具えている。

50 【0084】誘電体膜310は、光導波路308の屈折

率よりもできるだけ小さな屈折率を有し、かつ、基本波及びSHは実質的に吸収しない材料で構成するのが望ましい。この実施例の場合は、この誘電体膜310を厚さが1~2 $\mu\text{m}$ 程度の $\text{SiO}_2$ 膜310で構成している。この $\text{SiO}_2$ 膜310の形成は例えば電子線加熱による真空蒸着法を用いることができる。

【0085】電極302は、この実施例の場合は、薄膜で基板304側からクロムおよび金を積層した2層膜で構成する。金薄膜はこの種の素子の電極として用いられている実績があり、また、金薄膜のみでは基板304に10 対する実用的な密着度が得られない。このため、クロムを介することによって基板304との密着度が実用的な強度にしている。第1の電極302aと第2の電極302bとの間隔Gは大きすぎると光導波路308へ所望の\*

$$\Delta n(\lambda) = -(1/2) \cdot n^3(\lambda) \cdot \gamma_{33}(\lambda) \cdot E_z \cdots \cdots (12)$$

但し、 $\gamma_{33}(\lambda)$ は一次電気光学係数であり、 $\text{LiNbO}_3$ では $3.2 \times 10^{-11} \text{ m/V}$ である。尚、この値の $\lambda$ 依存性は厳密には測定されていないが、可視領域から近赤外領域にわたりほとんど依存しないことが知られている。従って、電極302に印加する電圧を制御することにより、屈折率 $n(\lambda)$ の関数であるコヒーレンス長さの値とブラッグ反射条件 $\lambda / \{2n(\lambda)\}$ を制御することができる。その結果、コヒーレンス長を与える曲線とブラッグ反射条件を与える曲線との交点を制御することができる。このようにして、この交点の位置を周期的分極反転構造の周期に合わせることで、より厳密\*

$$E_z = V / (2G) \cdots \cdots (13)$$

(15)式を(14)式に代入すると、(16)式が得られる。

$$\Delta n(\lambda) = -(1/2) \cdot n^3(\lambda) \cdot \gamma_{33}(\lambda) \cdot (2G) \cdots \cdots (14)$$

ここで、例えば、S-QPM条件について考察すると、S-QPM条件(1次のQPM条件を利用すると仮定し☆

$$(\text{分極反転構造の半周期}, \Lambda/2) = (\text{QPM条件})$$

$$= (\text{DBR条件}) \cdots \cdots (15)$$

ここで、

$$(\text{QPM条件}) = \lambda / [4 \{n(\lambda/2) - n(\lambda)\}]$$

$$(\text{DBR条件}) = p\lambda / 4n(\lambda)$$

である。

【0092】上述した(17)式はSHG素子の作製誤差および動作時の温度により厳密に満たすことは困難である。そこで、この実施例では、電界制御および温度制御により厳密な値からのずれを補償する。

【0093】ここで、電極に電圧Vを印加すると屈折率 $n(\lambda)$ が変化する。このため、QPM条件は以下の(18)式のように変化する。

$$(\text{QPM条件}) = \lambda / [4 \{n(\lambda/2) + \Delta n(\lambda/2) - n(\lambda) - \Delta n(\lambda)\}]$$

$$= \lambda / [4 \{n(\lambda/2) - (1/2) \cdot n^3(\lambda) \cdot \gamma_{33} \cdot (V/2G) - n(\lambda) + (1/2) \cdot n$$

\*電界を加えるのに要する電圧が高くなる。このため、現行の製造技術で安定に製造できる範囲を考慮してこの間隔Gを決定しなければならない。この実施例では、この間隔Gを1 $\mu\text{m}$ 程度とする。この電極302には、ワイヤボンディング法により引き出し配線(図示せず)が接続されており、この引き出し配線を介して電極302に電圧を印加することができる。

【0086】次に、電極302により電界制御した場合の光導波路308中の分極反転領域および非反転領域の屈折率の変化について説明する。ここで、この屈折率の変化を $\Delta n(\lambda)$ とし、基板304のZ軸方向(C面に垂直な方向)の電場成分の大きさを $E_z$ とすると、屈折率の変化は次式(14)で与えられる。

【0087】

※なQPM構造を有するSHG素子を実現することができることになる。特に、この実施例の場合は、S-QPM SHG素子を実現することができることになる。

【0088】次に、電極302に電圧Vを印加した場合の制御について考察する。この電圧Vを印加した場合の光導波路308のZ方向の電場成分の大きさ $E_z$ は第1および第2の電極302aおよび302bの間隔がGである場合、ほぼ次の式(15)で与えられることが知られている。

【0089】

★【0090】

☆ては、以下の(17)式のように表せる。

【0091】

$$^3(\lambda) \cdot \gamma_{33} \cdot (V/2G) \} \cdots \cdots (18)$$

一方、このときのDBR条件は、以下の(19)式のように表せる。

【0094】

$$(\text{DBR条件}) = p\lambda / 4 [n(\lambda) + \Delta n(\lambda)] \\ = p\lambda / 4 [n(\lambda) - (1/2) \cdot n^3(\lambda) \cdot \gamma_{33} \cdot (V/2G)] \cdots \cdots (19)$$

ここで、S-QPM条件からのずれを以下のように定義する。実際に作製されたQPM SHG素子の分極反転構造の周期が $\Lambda'$ であったとすると、

$$\delta_1 = (\Lambda' / 2) - (\text{QPM条件})$$

$$\delta_2 = (\Lambda' / 2) - (\text{DBR条件})$$

SHG素子の温度変化や素子製造に基づくS-QPM条件からの条件が発生し、 $\delta_1 \neq 0$ 、 $\delta_2 \neq 0$ となった場合、上述したように電圧Vを調整することで、 $\delta_1 = \delta_2 = 0$ とすることができる。

【0095】次に、電圧を印加した場合のQPM条件およびDBR条件の変化の様子の計算結果を示す。図14は、SHG素子の光導波路に印加された電界とQPM条件及びDBR条件との関係を示す図である。横軸は、基本波の波長(nm)を表し、縦軸は、反転分極構造の周期を表している。図中、コヒーレンス長(QPM条件)を満足する条件を曲線Iおよび破線IIを示してある。曲線Iは、電極に電圧を印加していないときのQPM条件を示し、破線IIは、電極に10Vの電圧を印加した場合のQPM条件を示している。一方、図中、(DBR条件)を曲線IIIおよび破線IVで示してある。曲線IIIは、電極に電圧を印加していない時のDBR条件を示し、破線IVは、電極に10Vの電圧を印加した場合のDBR条件を示している。図14に示すように、破線IIおよびIVの交点の周期は、電圧を印加しない場合に比べて2nm短くなっている。従って、SHG素子の設計上の分極反転構造の周期と実際のSHG素子の周期との間に実効的にこの程度の差であれば、電圧を印加することによって補正をすることができ、SHG素子の変換効率を最大にすることができることになる。

【0096】次に、温度制御とQPM条件およびDBR条件との関係について説明する。一般に、SHG素子の温度を変化させることによって光導波路の屈折率が変化することが知られている。

【0097】次に、温度を制御した場合のQPM条件およびDBR条件の変化の様子の計算結果を示す。図15は、SHG素子の光導波路の温度とQPM条件及びDBR条件との関係を示す図である。横軸は、基本波の波長(nm)を表し、縦軸は、反転分極構造の周期を表している。図中、コヒーレンス長(QPM条件)を満足する条件を曲線Vおよび破線VIを示してある。曲線Vは、300Kの温度下の場合のQPM条件を示し、破線VIは、350Kの温度下の場合のQPM条件を示している。一方、図中、(DBR条件)を曲線VIIおよび破線VIIIで示してある。曲線VIIは、300Kの温度下のDBR条件を示し、破線VIIIは、350KのDBR条件を示している。図15に示すように、破線VIおよびVIIIの交点の周期は、300Kの場合に比べて40nm長くなっている。従って、SHG素子の設計上の分極反転構造の周期と実際のSHG素子の周期との間に実効的にこの程度の差であれば、温度を制御することによって補正をすることができ、SHG素子の変換効率を最大にすることができることになる。

【0098】一般に、温度制御の方が、電界制御に比べて時間的な応答速度が遅いので、温度制御によりおおよその補正を行って、微調整を電圧の印加による電界制御によって行うことが望ましい。

【0099】また、現在のフォトリソグラフィの技術を用いれば、数十nmの精度でパターンを描画することができる。従って、現在のSHG素子の作製における作製

誤差は、温度および電界制御により十分に補正することができる。

【0100】尚、図14および図15に示した電界制御および温度制御の計算に当たっては、SHG素子の各パラメータとして以下の値を代入した。

$$G = 1 \mu\text{m} = 1 \times 10^{-6} \text{m}$$

$$\gamma_{11} = 32.2 \times 10^{-12} \text{ m/V}$$

$$n(1.3 \mu\text{m}) = 2.14538$$

$$n(0.65 \mu\text{m}) = 2.198824$$

$$p = 43$$

このように、SHG素子の製造誤差や動作時点での素子の温度により、分極反転構造の周期が理想的な条件からずれた場合も、このずれを補償して理想的な値に近い変換効率の達成を図ることができる。

【0101】尚、上述した温度御及び電界制御手段は、S-QPM SHG素子のみならず、DBR部分とQPM部分とを個別に具えたSHG素子に用いることもできる。

【0102】<SHG素子の説明>次に、SHG素子につき説明する。先ず、従来の問題を解決するための手法を説明する。上述した式(4)の2つのパラメータm、pのうちmの値は実用的には1または2である。従って、LiNbO<sub>3</sub>を例に挙げて説明すると、コヒーレンス長L<sub>c</sub>は基本波光源の波長が1.3μm程度であれば6μm程度である。この程度の寸法であれば、現在の技術をもってすれば、周期的分極反転構造を形成することは容易である。従って、m=1について考察すると、これに対するpの値は40程度である。これらのことと、LiNbO<sub>3</sub>の屈折率を考慮すると、pの値が1異なれば(4)式で与えられる条件は0.25μm程度変化する。これは、コヒーレンス長が0.25μmに対応する基本波の変化分に相当する波長分以上細かくSHG波長を選択出来ないことを意味している。そこで、この発明では、DBR構造の部分とSHG素子としての部分とを同一の光導波路(一体的であってもまたは個別的であってもよい。)において分離することによりこの問題を解決する。この時、上述した式(1)で求めたΔnを用いる。

【0103】そこで、この発明のSHG素子は、SHG部分とDBR部分とは兼用せずに、光導波路に個別に設けてある。その一実施例を図1に示す。図1に示すSHG素子100の構造では、例えばLiNbO<sub>3</sub>の基板102に、既に説明したと同様な方法によって光導波路104を形成する。そして、この光導波路104には、屈折率n<sub>1</sub>、n<sub>2</sub>が交互に異なるように、周期的分極反転領域(ドメイン反転領域)106を設け、その周期を部分的に変えた領域を設けることによって、QPM SHG部分110とDBR部分120とを構成する。この構成の仕方は種々あるが、この実施例では、QPM SHG部分110の左右両側にDBR部分120を設けて

あり、しかも、これらDBR部分120にSHG素子100の入射端および出射端を形成した例である。この两部分110および120の形成方法自体は同じであるが、それぞれの部分の分極反転周期が異なっている。DBR部分120は基本波の波長に対しては反射条件を満足するように、また、出来るだけ低次のブラッグ条件を満足するようにその周期 $\Lambda_{000}$ を決定するのが良い。このとき、上述した実験により求めた $\Delta n$ を用いることは言うまでもない。

\*

$$\Lambda_{000} / 2 = p \lambda / 4 [n(\lambda) + 0.0531] \quad \dots (16)$$

ここで、 $n(1.327)$ であるから、 $1.327/4(2.144 + 0.0531) = 0.151$ となる。半導体レーザ(LD)への帰還効率は、 $p$ が奇数であるほうが大きいこと、およびフォトリソグラフィ等の都合を考えると、 $p=7$ 程度が望ましい。そうすると、 $\Lambda_{000}/2 = 1.06 \mu\text{m}$ となる。

【0106】一方、QPM SHG部分の半周期 $\Lambda_{sc}$ は既に説明したように、ほぼ $6.5 \mu\text{m}$ とすれば良い。\*

$$R = \{ [1 - (n_2/n_1) n_2 (n_2/n_1)^{2X}] \div [1 + (n_2/n_1) n_2 (n_2/n_1)^{2X}] \}^2 \quad \dots (17)$$

$n_1 = n(1.327) + 0.0513 = 2.1953$ であり、また、

$$n_2 = n(1.327) + 0.0513 + 0.001 = 2.1963$$

であるから、750周期( $2X=1500$ )とすれば、 $R=0.3922$ となり、ほぼ40%の反射率が得られる。DBR部分の寸法は、 $1.06 \times 1500 = 1590 \mu\text{m}$ 、すなわち、1.6mm程度である。

【0109】また、QPM SHG部分は5から10mmとすれば充分なSHG変換効率が得られるので、素子全体の寸法は6.6から11.6mm程度で充分であることになる。すなわち、従来のSHG素子に比べて10%程度(数mm程度)大きくなるにすぎない。

【0110】上述した実施例では、DBR部分をSHG部分の入射端側に1つだけ設けた例であるが、図1に示すように、SHG素子100の入出力端にDBR構造120をそれぞれ設け、このDBR部分120でSHG部分110を挟んだ構造としてもよい。このように構成すると、SHG素子100のSHG効率を高くすることが出来る。DBR構造120を入射端側のみの設けたSHG素子構造の場合と、入出力の両端側にDBR構造120をそれぞれ設けたSHG素子構造100とでは、SHG変換効率はDBRの反射率を $r$ として表すと、 $(1-r)^{-1}$ 倍になることが知られているので、この2つのDBR構造120を両側に設けたSHG素子構造は、1つのDBR構造を具えたSHG素子構造の場合に比べて、 $(1-0.4)^{-1} = 1.67$ 倍となる。従って、このSHG素子100の長さはさらに1.6mm長くなるにすぎない。

【0111】このDBR部分およびQPM SHG部分

\*【0104】ここで、SHG素子を一例として、図1に示した構造とは異なり、SHG素子の出射端側に設けた1つのSHG部分と、入射端側に設けた1つのDBR部分とをで構成した構造とする。そして、 $\text{LiNbO}_3$ を例にとり、かつ、基本波の波長を $1.327 \mu\text{m}$ 程度として、具体的に説明する。DBR部分の周期 $\Lambda_{000}$ は次式(12)で与えられる。

$$[0105]$$

※従って、分極反転部分と非反転部分との屈折率差はほぼ $10^{-3}$ 程度である。このため、DBR部分の周期の数すなわちDBR部分の寸法は、反射率を40%程度に出来れば良いことを根拠に見積もれば、以下のようになる。

【0107】周期の数を $X$ とし、分極反転部分の屈折率を $n_1$ 、非反転部分の屈折率を $n_2$ とすると、DBR部分の反射率 $R$ は次式(13)のように与えられる。

$$[0108]$$

は、光導波路が具備していればよいので、これらの配列順序や個数はこの発明では何ら限定されるものではない。

【0112】また、上述した実施例のSHG素子では、同一の基板の光導波路104がQPM SHG部分110とDBR部分120とを有した構造となっている。しかしながら、これに何ら限定されるものではなく、後述する図2に示す構造のように、このQPM SHG部分とDBR部分とを別の基板に設けて、それぞれを個別の素子部分として形成してもよい。勿論、その場合には、基板、光導波路の条件は両者とも同一とする。両者の相違は、単に、周期 $\Lambda_{sc}$ および $\Lambda_{000}$ の値が異なるだけである。

【0113】<SHG装置の説明>次に、図2、図3および図4を参照して、この発明のSHG装置の実施例を説明する。

【0114】このSHG装置を設計するに当たり、従来の問題点を解決するためには、LDの片端面を高反射(HR)コーティングすれば良いと思われるが、現実には困難である。反対側の端面(SHG素子に接続する側)を反射率0に形成出来れば問題ないのであるが、現実には不可能であるため、僅かな残留反射によりファブリ・ペロモードによる発振を起こし、当初のS-QPM SHGの実現という目的を果たせない。そこで、この発明では、例えば、この反対側端面をHRコーティングする代わりにDBR構造を用いる。このDBRの設計に上述した $\Delta n$ を用いる。

【0115】そこで、図2は、SHG素子をQPM SHG部分とDBR部分を個別の基板に設け、それぞれQPM SHG部分の素子210およびDBR部分の素子として構成する。これら素子をそれぞれQPM SHG

構造素子およびDBR構造素子と称する。これらを素子210および220を、入射端面の両端面を高反射コーティングする代わりに低反射コーティングしてある半導体レーザ(LD)230と、光学手段240例えばレンズ系を用いて、光学結合させて、SHG装置を構成した例である。この場合、QPM SHG部分の素子210およびDBR部分の素子220は、上述した実施例のSHG素子の場合と同様に、各基板200および202に設けた光導波路204および206が周期的分極反転領域(ドメイン反転領域)を互いに周期 $\Lambda_{sc}$ および $\Lambda_{\dots}$ のみを変えて有した構造と成っている。好ましくは、DBR構造素子220は反射率を大きくするため、十分な長さとするのが良い。例えば、DBR構造素子220の寸法を10mmとすると、反射率Rを98%以上にすることが出来る。

【0116】図3は、SHG装置の他の実施例を示す図である。この実施例では、LD230の両端面側に図1に示したと同様な構造のSHG素子100を配設して、レンズ系240を用いて、これらSHG素子とLD230とを光学的に結合させた構造と成っている。この構造では、第2高調波であるSH波( $2\omega$ )は、変換されなかった基本波( $\omega$ )と一緒に両素子から互いに反対な2方向に出射する。

【0117】図4に示す別の実施例のSHG装置の構造では、SHG効率を高めた構造であり、図3で示したSHG装置の構造の両出射端面に、所要に応じてレンズ系その他の光学的手段(図示せず)を介して、光ファイバ250および252を光学的に結合し、これら光ファイバ250および252を例えば光カプラー等の光合成手段260に結合して、第2高調波を効率よく取り出すことも出来る。

【0118】この発明は、上述した実施例にのみ限定されるものではなく多くの変更および変形を行ない得ることは当業者に明らかである。例えば、上述した実施例では、 $\text{LiNbO}_3$ を基板の材料として用いたが、この発明では、例えば $\text{LiTaO}_3$ 、またはKTPを用いても良い。

【0119】

【発明の効果】この発明によれば、SHG素子の光導波路の実効屈折率をSHG変換効率とDBR反射率の実測値から求め、SHG素子の設計にこの結果をフィードバックさせてある。従って、SHG素子の設計の段階で正確に光導波路の実効屈折率を知ることができ、分極反転構造の周期等を一層理想的に設定出来る。

【0120】また、例えば、この発明の方法で決定した実効屈折率に基づいて設計されたSHG素子において、温度制御および電界制御により補正を行えば、ほぼ理想に近いSHG変換効率の実現を図ることができる。すなわち、LDを基本波光源としたQPM SHG素子をSHG変換効率を理想限界に近い高い状態で利用すること

が可能となる。

【0121】そして、先に提案したSHG素子ではS-QPM SHGにおいては分極反転構造の部分にDBRとしての機能も兼ねさせる必要があったが、この発明のSHG素子によれば、分極反転構造部分をDBRとしての機能を持たせる部分とQPMの機能を持たせる部分とに分離している。これにより、先に提案したS-QPM

SHGにおいては離散的波長のみにSHG素子を設計して構成することが出来なかったが、この発明によれば、上述したように基本波としての任意の波長に対するSHG素子の実効屈折率を正確に求めることが出来るので、この実効屈折率を用いて、DBR部分の周期 $\Lambda_{\dots}$ を知ることが出来、あらゆる波長に対応してSHG素子を設計して構成することが出来る。

【0122】この発明のSHG素子を用いてSHG装置を構成すると、SHG素子が光導波路中にQPM SHG部分とDBR部分とを順次に具えるか、LDの一方の側にQPM SHG部分を他方の側にDBR部分を設置することになるので、SHG効率を従来のSHG装置と比べて向上させることが出来る。また、SHG装置から2方向に出るSHG波を光合成器で合成すれば、基本波光源としてのLDの出力エネルギーを全て有効に使用出来る。このように、この発明のSHG装置によれば、SHG効率を実質的に向上させることが出来る。

【図面の簡単な説明】

【図1】この発明のSHG素子の構造の一実施例を概略的に示す斜視図である。

【図2】この発明のSHG装置の一実施例を概略的に示す斜視図である。

【図3】この発明のSHG装置の他の実施例を概略的に示す斜視図である。

【図4】SHG装置の2つのSHG出力を光合成手段を用いて合成する例を示す構成図である。

【図5】従来のSHG素子の構造の説明のための斜視図である。

【図6】従来のSHG装置の構造の説明のための斜視図である。

【図7】SHG素子の設計の説明に供する、基本波の波長に対するコヒーレンス長 $L_c$ および $L_w$ の関係を示す図である。

【図8】SHG装置の設計の説明のためのSHG装置の斜視図である。

【図9】SHG装置の設計の説明に供する、LDの発振スペクトル図である。

【図10】SHG装置の設計の説明に供する、SHGのスペクトル図である。

【図11】SHG装置の設計の説明に供する、LDのスペクトル図である。

【図12】この発明の実効屈折率決定方法の説明に供する、Ti:サファイヤレーザのスペクトル分布図であ

る。

【図13】SHG素子の温度及び電界制御手段の説明に供する斜視図である。

【図14】SHG素子の光導波路に印加された電界とQPM条件及びDBR条件との関係を示す図である。

【図15】SHG素子の光導波路の温度とQPM条件及びDBR条件との関係を示す図である。

【符号の説明】

100:SHG素子

102, 200, 202, 304:基板

104, 206, 208, 308:光導波路

\*106, 218, 219:周期的分極反転領域

110:QPM SHG部分

120:DBR部分

210:QPM SHG構造素子

220:DBR構造素子

230:半導体レーザ

240:光学的手段

250, 252:光ファイバー

260:光合成手段

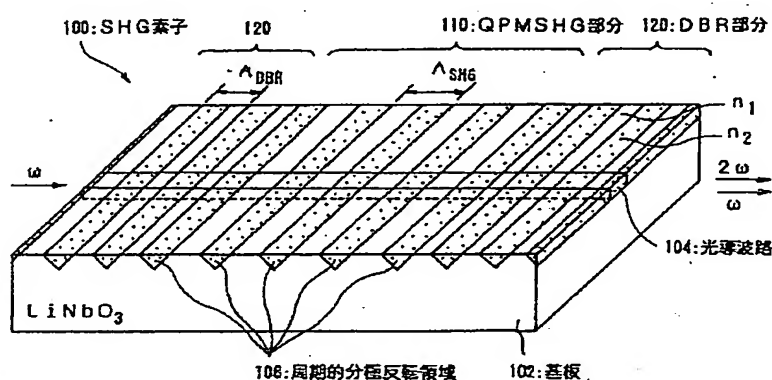
300:ヘルチェ素子

306:周期的分極反転構造

10 310:誘電体膜

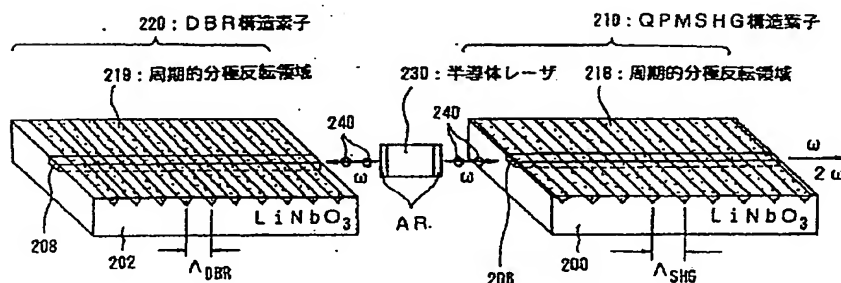
\*

【図1】



この発明のSHG素子

【図2】

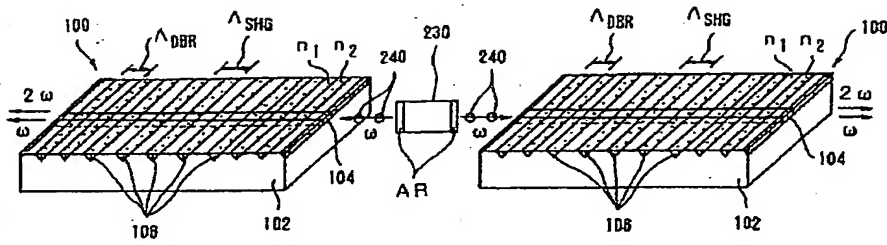


200, 202:基板 206, 208:光導波路

SHG装置の例

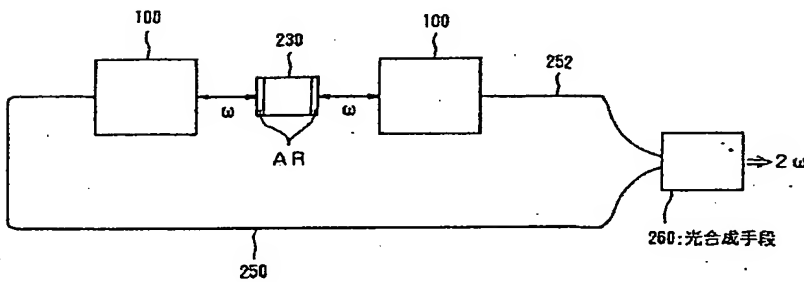


【図3】



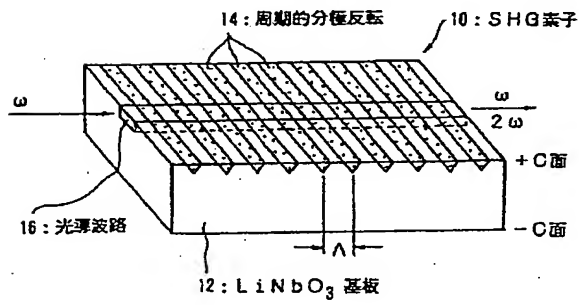
SHG装置の例

【図4】



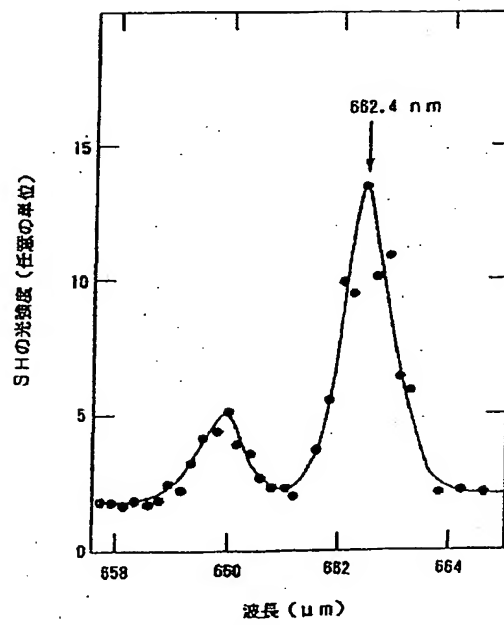
SHG装置の例

【図5】



従来のSHG素子

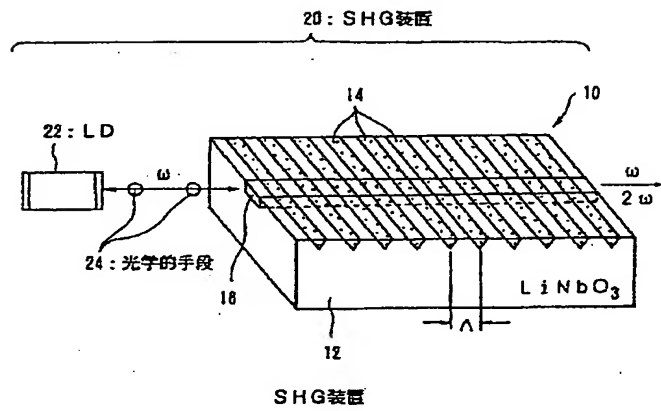
【図10】



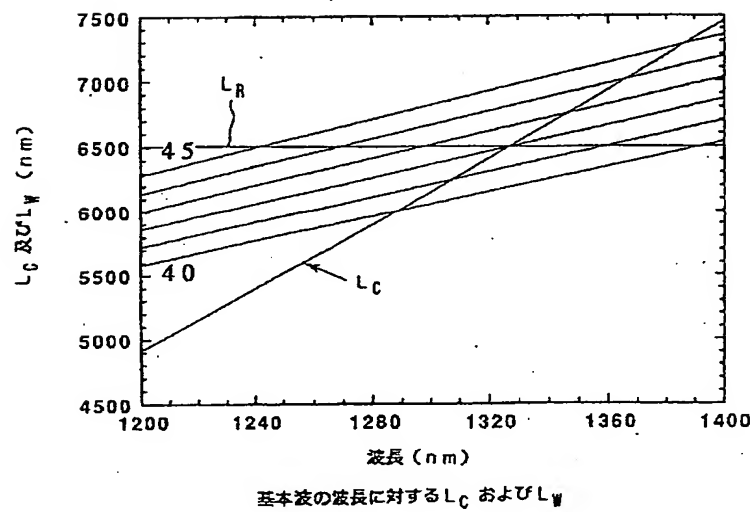
SHGスペクトル



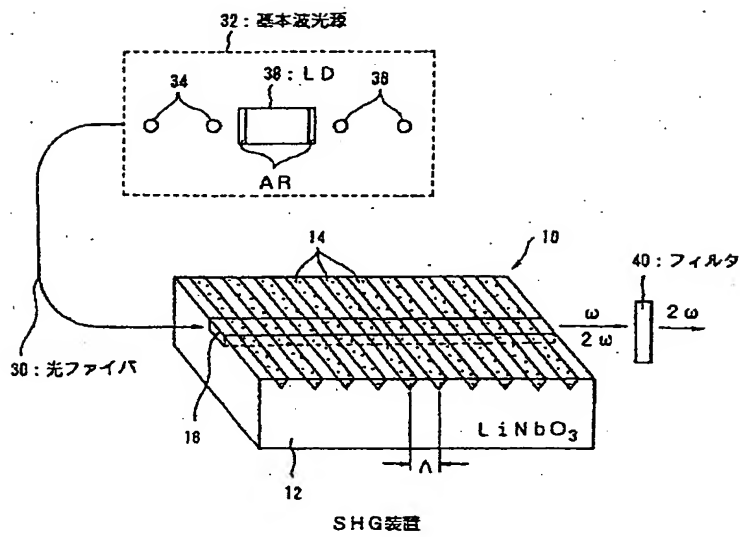
【図6】



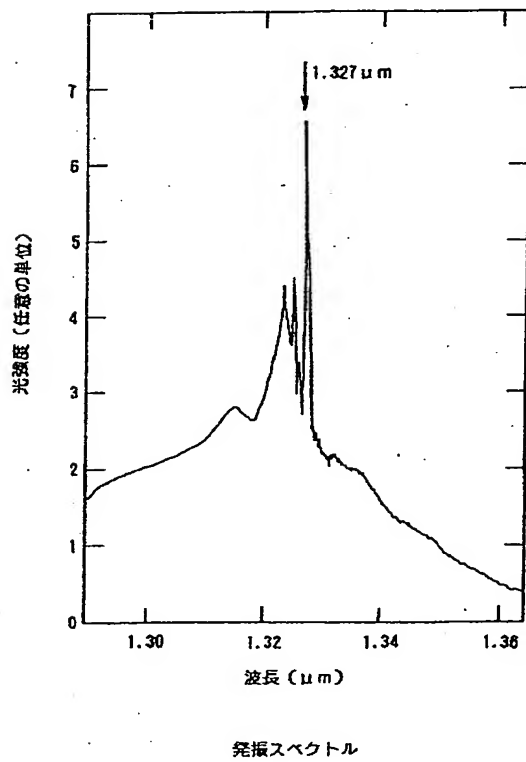
【図7】



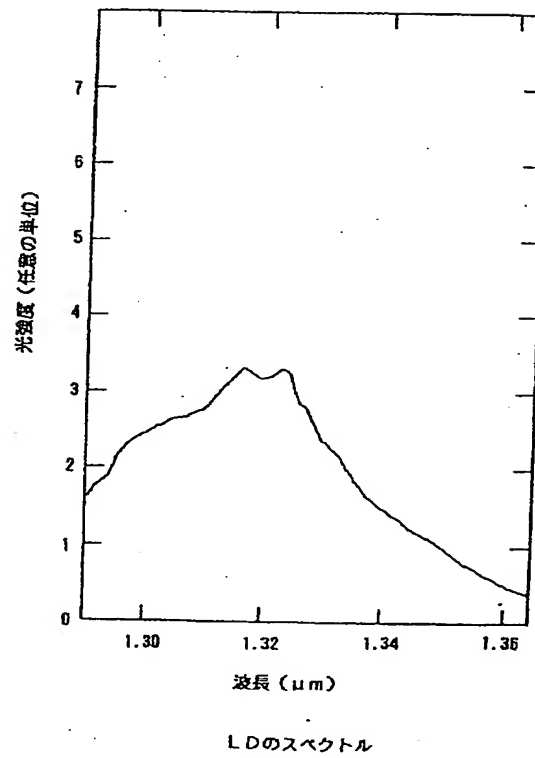
【図8】



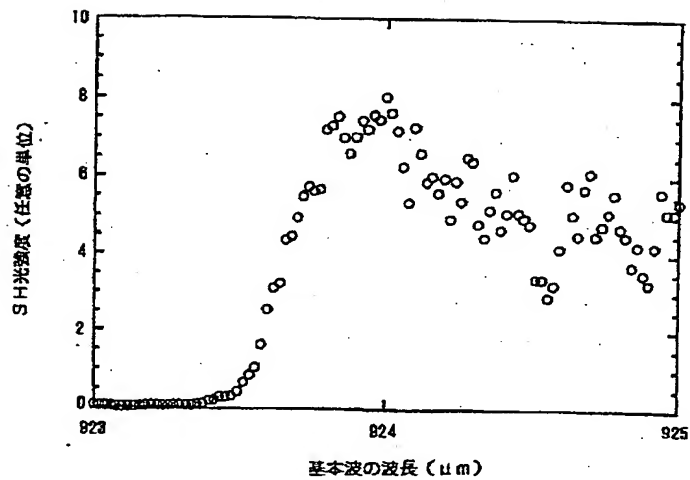
【図9】



【図11】

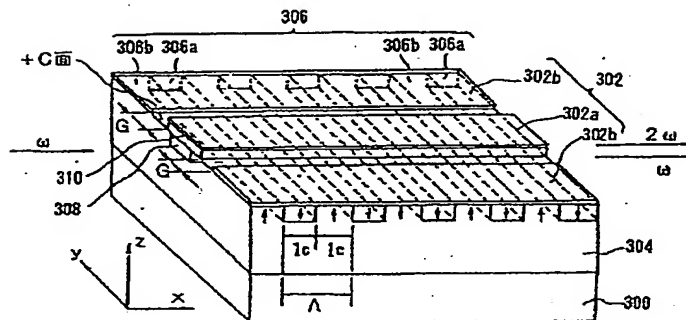


【図12】



Ti : サファイヤレーザのスペクトル分布図

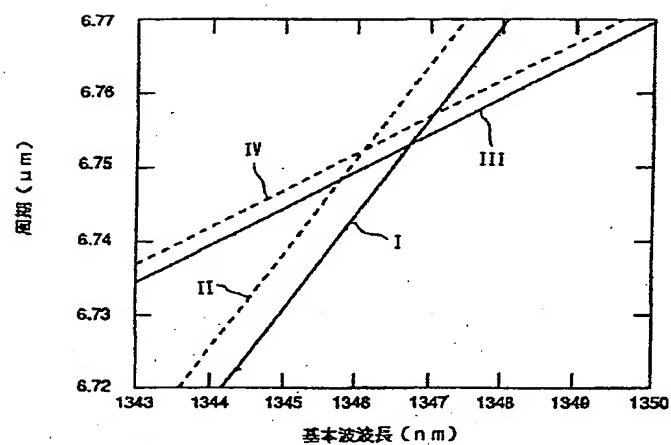
【図13】



- 300 : ペルチェ素子      304 : 基板 (例えば  $\text{LiNbO}_3$  基板)  
 302 : 電極  
 302a : 第1の電極      302b : 第2の電極  
 305 : 周期的分極反転構造      305b : 基板部分 (非反転領域)  
 305a : ドメイン反転領域      310 : 压電体膜  
 308 : 光導波路

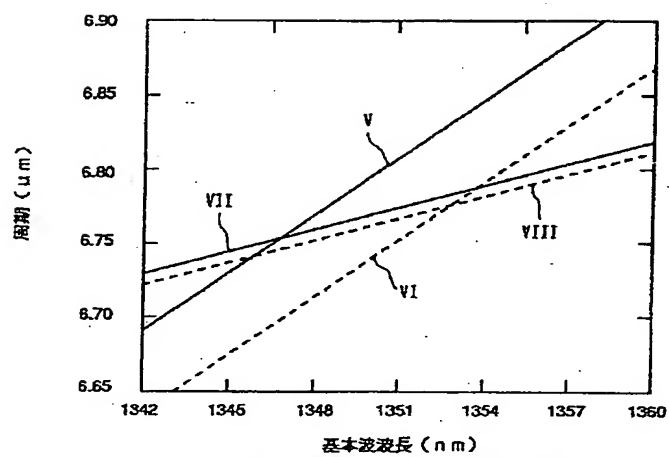
SHG素子の温度及び電界制御手段の説明図

【図14】



電界とQPM条件及びDBR条件との関係

【図15】



温度とQPM条件及びDBR条件との関係